

検潮井戸の応答に関する一考察

著者	阿部 邦昭
雑誌名	日本歯科大学紀要．一般教育系
巻	15
ページ	31-42
発行年	1986-03-25
URL	http://doi.org/10.14983/00000288



検潮井戸の応答に関する一考察

Investigation of Tide Well Response on the Model

新潟歯学部 阿 部 邦 昭

Kuniaki ABE: Physics Laboratory, Nippon Dental University,
Hamaura-cho, Niigata 951, JAPAN

(1985年12月19日 受理)

概 要

簡単なモデル実験を行い、その結果をもとにして検潮井戸の応答について考察した。モデル実験は内径 (D) が 23.2cm のガラスビン中に溜めた水道水が、下端の出口から水平に出した細いガラス管 (内径 d , 長さ l) を通して流出する時、その流出速度及びビン内水位の時間変化を測定することからなりたっている。その結果、流出速度 v は g を重力加速度、ガラス管のレベル h_0 との水位差を $h-h_0$ とし、 l/d が 0.02 より大きい時は $v=c\sqrt{2g(h-h_0)}$ で表わされる。このとき使用した内径、長さの種々異なるガラス管に対して、定数 c の値は 0.56 ないし 0.81 となる。なおこの近似のなりたつ時、水位の時間変化は時間の 2 次式で表わされるので、この式より応答時間 $(2k/c)\sqrt{H_0}$ を定義した。ここで $k=\sqrt{2/g}(D^2/d^2)$ であり H_0 は $t=0$ での水位と外部水位の差である。従って応答時間は流管と水溜の口径比 D/d に最も強く依存する。 H_0 が 22.3cm の場合に対してこの時間を計算し、125 ないし 2899 秒をえた。水溜を検潮井戸、管を導水管とみなすと、この実験は外海の高さ H_0 の階段状水位変化に対する井戸の水位応答のモデルと見なすことができる。モデルは実際の場合に比して、慣性力より、粘性力のまさったものになっている。

§1. は じ め に

日本海中部地震津波を契機に検潮所の津波に対する応答の正確さを見なおすことが行

われている。村上(1983)は水理学の成果をもとに理論的に検討し、各地の検潮所における日本海中部地震津波の振巾の減衰比を計算し、最大浸水高と比較した。岡田・網野(1984)は深浦検潮所の特性を井戸の水位の回復の時間変化をもとに求めた。日本の検潮所のように導水管を使わずに穴のあいた井戸による検潮所の応答については Noye(1974), Braddock(1981) 及び Loomis(1983) 等による議論があり、その中では応答の非線形効果が強調されている。これらの結果から、井戸での水位変化を測定する方法では周期の他に振幅によって応答がことなり、驗潮記録による津波波形の解釈には注意が必要であることがわかる。これにともないスペクトル解析の限界も明らかにすることが重要である。特に問題となるのは短周期で大振幅の波が入射する場合で、このような場合の応答のしかたをしらべこれまでの議論の可否に対する指針としたい。井戸の応答を実験によってしらべる方法として、前述の岡田・網野(1984)によるものは一つの現実的方法である。このような方法によりどんなことがわかるかをモデル実験によってしらべる。特に一つの目安として、水をくみ出してせきとめ、再び入れた場合の水位の回復にようする時間の長さが短周期側の再現限界を示す一つの指標と考えられるのでこれをしらべる。

§ 2. モデル実験

室内に透明な大容量のガラスビンを用意し、これに高さ 30cm 程度になるように水道水を入れ、これが細いガラス管を通じて流出する際の速度及び水位の時間変化を測定した。使用したガラスビンは内径が 22.3cm、一様太さ部分の長さ 35cm で下部に内径 3 cm の排出口をもつものである。この排出口にゴム栓を使って、内径 d が 0.300, 0.562, 1.065cm の3種類のガラス管を水平にしてさし込み、水を流出させる。この時、ガラス管長 l は d が 0.300 の場合、10.0 及び 30.0cm, 0.562 の場合は 10.0, 30.0, 50.0cm, d が 1.065 の場合は 10.0cm と変化させた。ガラス管の内径は読み取り顕微鏡により 1/1000cm まで、長さはスケールで 0.1cm まで読み取った。又水位の測定はビンの外側に接して、垂直に立てたスケールをもとに 0.05cm まで目測した。又ビンの内径は排出した水量と水位差をもとにして、8ヶ所で測定して平均値を求めた。時間は 0.1 秒きざみのストップウォッチによって測定した。その測定装置を1図に示す。最初に、流出する水の速度を測定した。速度 v とガラス管の高さ s , 水の落下点距離 L の間には g を重力加速度として

$$v = \sqrt{\frac{gs}{2}} \cdot L \quad (1)$$

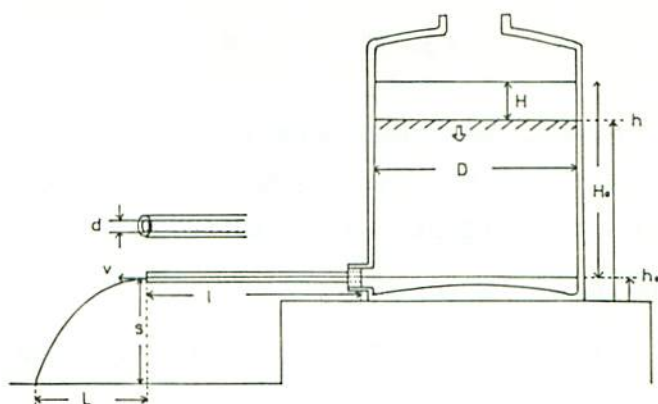


Fig. 1 Measuring instrument of velocity and water level at an outflow.

の関係がある。この関係を使い、 s と L を測定することにより、水位差 $h-h_0$ に対する速度を求めた。なお h_0 はガラス管の中心の高さで近似した。これによって求めた速度 v は水位差の時間変化から求めるものよりばらつきが少なく精度が良い。又水位差の時間変化を6つのケースについて測定した。読み取り時間の間隔は30又は15秒とした。

次にビンに水が流入する場合の水位差の時間変化を測定した。この場合が岡田・網野(1984)による実験に対応する。これは管長 10.0cm で口径 d が 0.562及び 0.300cm の2つの場合のみ行った。この場合は2図のように上部が開いたプラスチック容器を、ガラス管の出口につなぎ、最初はガラス管を通じてビン側に水が流れ込まないように、プラスチック容器側に栓をしておいて水をため、満杯にし、水道水を補給している状態にしておいて栓をぬき、流れ込みによるビン内水位の変化を15秒又は30秒間隔で読み取った。

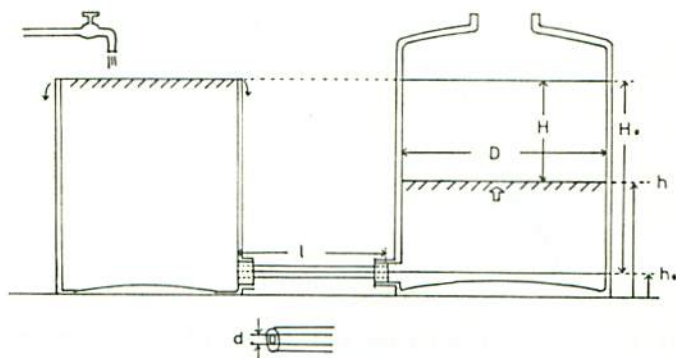


Fig. 2 Measuring instrument of water level at an inflow.

§ 3. 結 果

求めた流出速度を縦軸に、横軸に水位差の平方根 $\sqrt{h-h_0}$ をとって示したのが3図及び4図である。3図はガラス管長 10.0cm で3種類の内径に対するものである。長さ0で穴の内径が小さい時は、流出速度はベルヌーイの定理から

$$v = \sqrt{2g(h-h_0)} \quad (2)$$

で表わされることが知られている。ここでの結果は c を1より小さい定数として

$$v = c\sqrt{2g(h-h_0)} \quad (3)$$

と表わされることを示す。 c の値を目測から求めると、 d の大きい順に0.81, 0.69, 0.60であり、 d が大きくなるとともに c は増加する傾向を示した。 d を一定にしておいて l

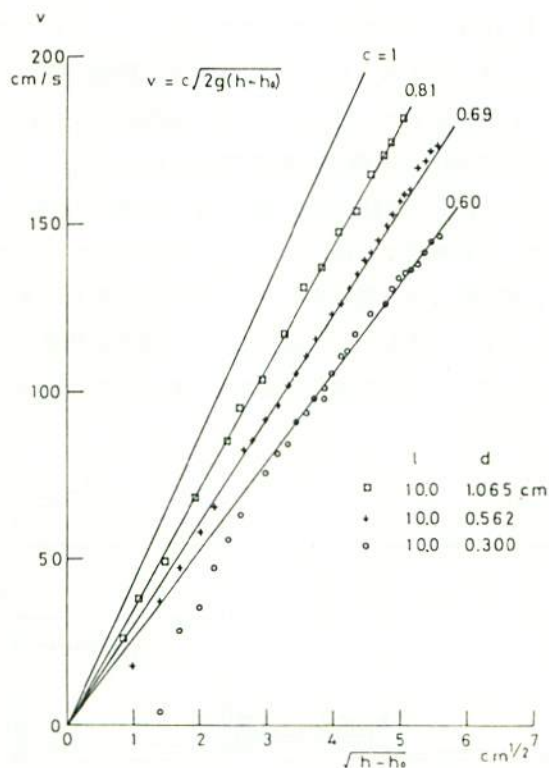


Fig. 3 Velocity curves for the glass tubes with some diameters. Marks indicate the velocities measured for various water levels. Solid lines are the calculated ones.

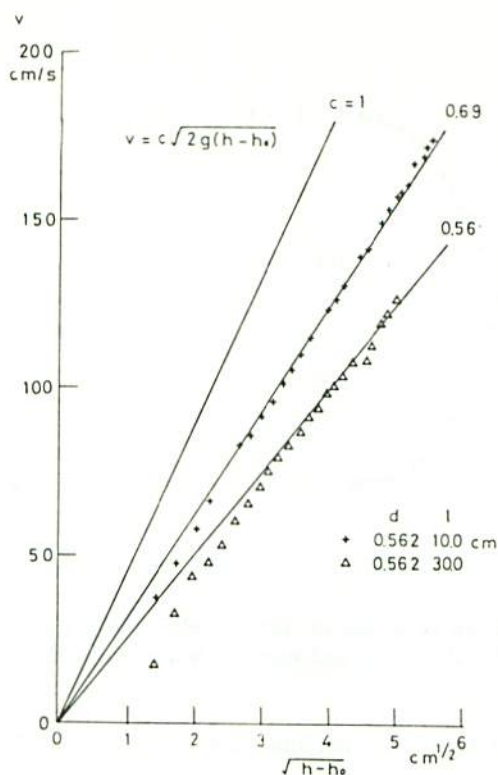


Fig. 4 Velocity curves for the glass tubes with different lengths.
Marks for measurement and solid lines for calculation.

を変化させた時の速度を4図に示す。 l が増加するとともに、(3)式の近似が悪くなる傾向にある。 l が50.0cmの場合はここに示されていないが、(3)式からのずれは $l=30.0$ cmの場合より大きくなる。

次に水の流出と流入について、水位の時間変化を測定し、比較した。流出開始時のビン内水位と、流入時のプラスチック容器の水位を同一にして行った実験の結果を5図に示す。これより両者とも最初の水位からの差を横軸にとってプロットすると、両者はほとんど一致することがわかる。このことはそれぞれの時刻で、静水圧の差によって水流が生じていることを示すものである。両者が同一の時間変化をするので、流入と流出を区別する必要はない。

次に1図の装置で流出時の水位の時間変化を測定した。縦軸には流し始めの水位と平衡水位の差 H をとってプロットした。このように H を定義すると、流入でも流出でも $t=0$ ととれるのでわかりやすい。流出の場合のみを、6図と7図に示す。これらすべて

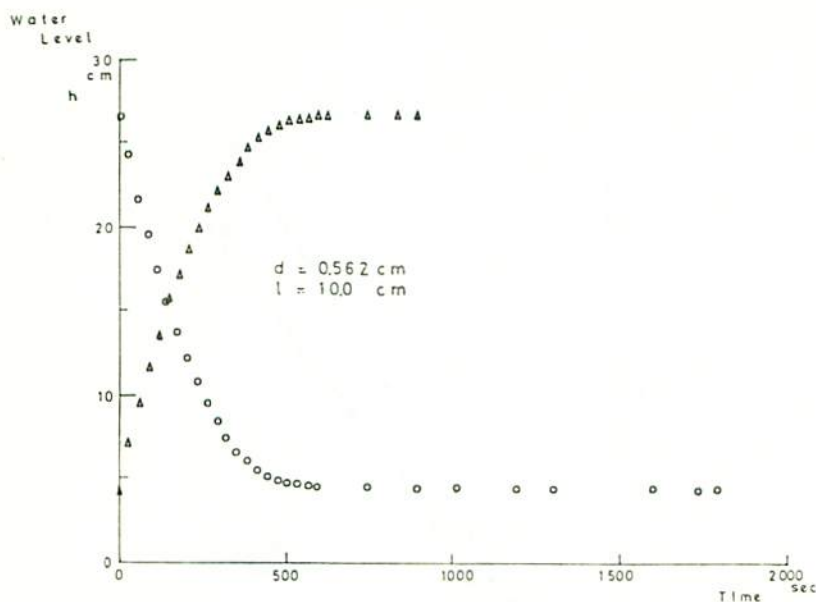


Fig. 5 Time variations of water level in the mark of triangle for the inflow and open circle for the outflow.

の場合について $H=0$ の面を $h=26.7\text{cm}$ に統一した。又すべてについて $h_0=4.4\text{cm}$ で、最終水位差 H_0 は 22.3cm である。管の内径が小さくなるとともに、3, 4 図で示したように、速度が小さくなり、相対的に粘性力が優勢になり、時間変化が鈍ってくる。表面張力の影響も大きくなり H はなかなか最大値にならない。これは d/l が小さい程顕著である。

§ 4. 水位の時間変化

水位の時間変化は流出速度を v として

$$-\frac{d(h-h_0)}{dt} = \frac{d^2}{D^2}v \quad (4)$$

で表わされる。ここで実験により v については (3) 式がなりたつので、(3) を (4) に代入して

$$-\frac{d(h-h_0)}{dt} = \frac{cd^2}{D^2}\sqrt{2g(h-h_0)} \quad (5)$$

がえられる。新変数 H を使って (5) の $h-h_0$ を H_0-H でおきかえ積分すると

$$\frac{1}{2}\sqrt{H_0-H} = \frac{c\sqrt{2g}d^2}{D^2}t + c_0 \quad (6)$$

となる。ここで c_0 は積分定数である。 $t=0$ では $H=0$ なので

$$c_0 = \frac{1}{2}\sqrt{H_0} \quad (7)$$

が成り立つ。故に、

$$H = \frac{c^2}{k^2}t\left(\frac{2k}{c}\sqrt{H_0}-t\right) \quad (8)$$

がえられる。ただし k は定数で

$$k = \sqrt{\frac{2}{g}} \frac{D^2}{d^2} \quad (9)$$

である。 H は t の 2 次式である。この式で H が最大になる時間 t_r は

$$\left. \frac{dH}{dt} \right|_{t=t_r} = 0 \quad (10)$$

より

$$t_r = \frac{k}{c}\sqrt{H_0} \quad (11)$$

となる。この t_r は水位差 H_0 が実現するのに要する時間とみなせる。そこでこれを応答時間と呼ぶことにする。これは最終水位差 H_0 の平方根に比例する。又 k は口径比の 2 乗に比例するので応答時間も口径比の 2 乗に比例する。しかし速度係数 c は前節で述べたように、 d の影響をうけるので、 d を変化させるときは c もわずかではあるが変化することに注意がいる。

流出速度の実験でえた係数 c を使って $H_0=22.3\text{cm}$ に対して、その時間変化を (8) から計算した。それを水位の時間変化のグラフに重ねて、6, 7 図に示す。なお速度式 (3) の近似がわるい $d=0.30\text{cm}$ で $l=30.0\text{cm}$ の場合と $d=0.562\text{cm}$ で $l=50.0\text{cm}$ の場合は 7 図の水位変化にあうように c を決めたとこ、0.40 及び 0.44 がえられた。この 2 つの場合を除外して考える時、測定値と計算による 2 次曲線の一致の程度は、速度則 (3) との一致の程度に依存している。時間とともに顕著になるずれは、速度が (3) 式よりも小さくなることに対応している。そのずれの大きさは d/l が小さくなるとともに大きくなる傾向にある。

ここでえられた 6 個の速度係数 c (1 表) を横軸に d/l をとってプロットすると 1 本の曲線上のことが 8 図からわかる。 d/l が 0.02 以上では c は 0.56 から 0.81 までゆるやかに増加する。速度則 (3) にのらない場合は d/l が 0.02 より小さい場合で、これより小さくなると c は急減する。

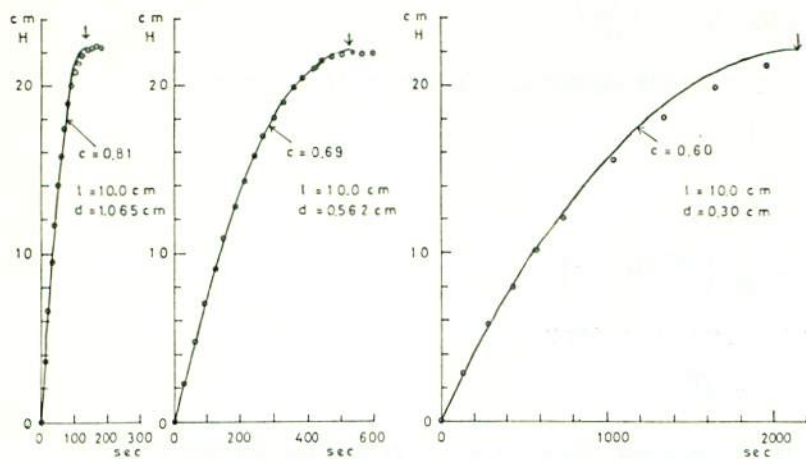


Fig. 6 Measurements of time variations of water level, indicated with open circles, and the application curves calculated with solid lines. Arrows correspond with the response times, t_r .

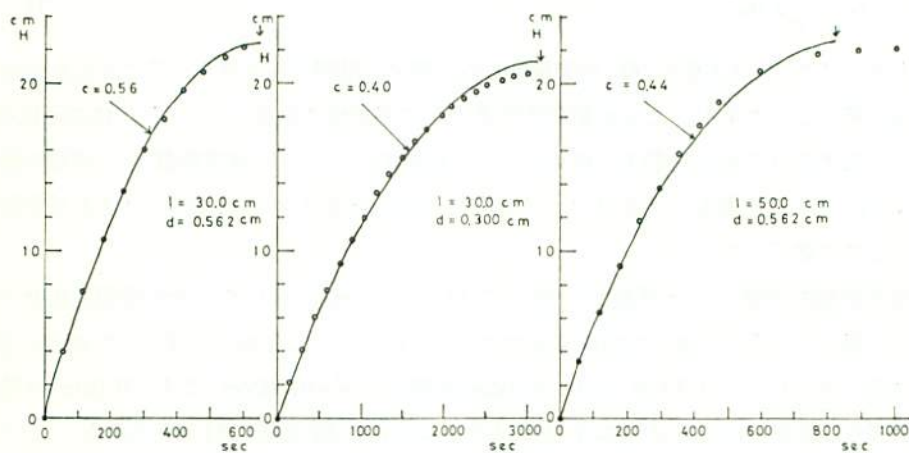


Fig. 7 The same explanations as for Fig. 6 are applicable to these figures.

Table 1 Coefficients of velocity c .

l/d	1.065cm	0.562cm	0.300cm
10.0cm	0.81	0.69	0.60
30.0cm		0.56	0.40
50.0cm		0.44	

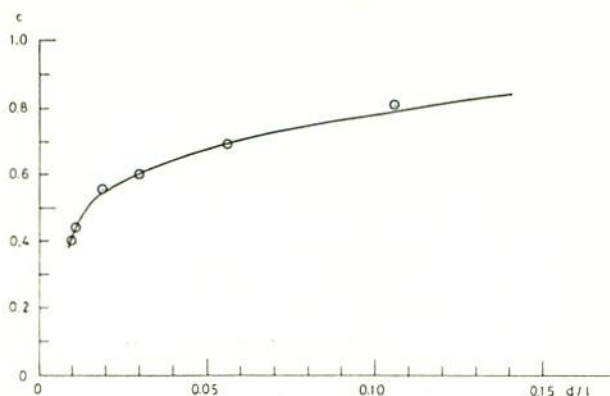


Fig. 8 Dependence of velocity coefficient c on the ratio of d/l .

§ 5. レイノルズ数

モデル実験の結果が検潮所と導水管の系と物理的に同一になるためには、レイノルズ数が両者の間で等しくなければならない。内径 d の管内を v の速度で水が流れている時、 ν を動粘性係数として、レイノルズ数は

$$Re = \frac{vd}{\nu} \quad (12)$$

と表わされる。モデル実験で水道水を使う時、水道水と海水の間での ν のちがいは小さく、これを無視するとモデルと実物の間で

$$vd = \text{const} \quad (13)$$

がなりたつ。モデルにおいて実物より小さな d を使う限り、 v を大きくしなければならない。そのためには水位差を大きくしなければならない。検潮所では導水管の直径を 10 cm 程度に保っているので、モデルは実物の 1/10 になり、速度は 10 倍、水位差にすると 100 倍必要であって、実験は困難になる。この実験が実物と物理的に等価になるのは d が実物の 1/10 なので、 v が実物の 10 倍になっている時である。実物の速度がモデルの 1/10 の時、等価になる。これからわかるようにモデル実験では、実物にくらべレイノルズ数が小さくなっている。つまり慣性力にくらべ粘性力のまざったモデルになっていることになる。

ところで実験した範囲でレイノルズ数の最大値を求めると $d=1.065\text{cm}$, $v=180\text{cm/sec}$ の場合で、この時 $\nu=0.0114\text{cm}^2/\text{sec}$ として 1.74×10^4 である。これは入口で少しでも乱れが存在すると乱流になる領域である(谷, 1969)。速度の水位差による変化を示す 3 図

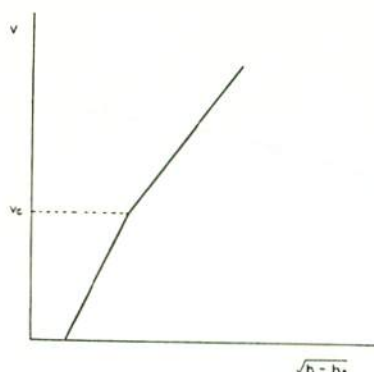


Fig. 9 Bending of velocity curve and the critical velocity, v_c .

において $d=1.065\text{cm}$ の場合を除く 2つの 場合に 明瞭であるが、速度曲線が $\sqrt{h-h_0}$ に比例する下限値が存在する。それ以下では速度が急減する（9 図）。その時の速度を v_c としてレイノルズ数を求めると

$$Re = \frac{v_c d}{\nu}$$

より 3500 ($d=0.562\text{cm}$, $v_c=70\text{cm/sec}$) 及び 2400 ($d=0.300\text{cm}$, $v_c=90\text{cm/sec}$) となり、低臨界レイノルズ数とされている 2000 に近い値になっている。従ってこの速度 v_c が乱流から層流に移る臨界値になっていると考えられる。

一方、検潮所では導水管の直径が 10cm 程度だから、ここで最も内径の大きい管の 10 倍大きいので、層流域は相対的に小さく、かなり小さな水位差まで乱流になっていることになる。検潮所のモデル実験で速度の大きい方で c をあわせるのはこの意味で適切である。

§ 5. 応 答 時 間

§ 3 で定義した応答時間について考えてみる。これは時間にかんして階段関数形の水位変化があった時の反応に要する時間であると考えることができる。検潮所においても (3) を前提にすれば、全く同一の意味に解釈できる。そこでこの応答時間を 6 つの場合について、1 表に示した c の値を使って (11) 式から計算した。ただしその時 H_0 はすべて 22.3cm とした。これは実験で実際に使った値である。その結果が 2 表である。8 図に示すように d による c の変化は小さいのに対して、 k の d による変化は 2 乗で大きいため大きい。実験の結果は、応答時間は管と水溜の口径比 d/D の影響を最も強く受けてい

Table 2 Response times t_r .

l/d	1.065cm	0.562cm	0.300cm
10.0cm	125sec	527sec	2021sec
30.0cm		652sec	2899sec
50.0cm		827sec	

ることがわかる。ちなみに長さ l の影響は c を通じて入り、 c の l 依存性は 8 図の形をとる。これは d/l が 0.015 以上の所では α を定数として

$$c = \alpha(d/l)^{0.22}$$

で表わされる。これより l が 2 倍になっても c は 90% にしかならないので、影響は小さいことがたしかめられる。

次に外部水位が周期的に変化する場合であるが、応答時間がその周期に比して、無視できる程小さければ、周期的変化を正確に記録する水位計になっていると考えることができる。無視できる値として応答時間が周期の長さの 1/10 であると仮定すると、最短応答時間の 125 秒 ($d=1.065\text{cm}$, $l=10.0\text{cm}$) に対してはその周期が 1250 秒つまり約 21 分である。従ってこれらを海水につなげて実際の検潮所として使うとすると 21 分より短い周期の波については追跡がおくれ、波形はひずむ。 H_0 が大きい場合には (11) 式によって応答時間はもっとのびる。

ここでえた応答時間を新潟県岩船港の検潮所に適用してみる。この D , d , l は設計上 0.65m, 0.12m, 1.8m になっている。これらの値を使って、速度係数 c を推定すると 8 図から c は 0.74 となる。ただし導水管の材質のちがいは無視したことになる。又 k は 1.33 となるから、 H_0 が 22.3cm に対しては 8.5 秒、100cm に対しては 18 秒となる。先に仮定した周期的波に対する 1/10 仮定を適用すると 100cm の周期的な波に対して、追跡できる最短周期は 3 分ということになる。一方、岡田・網野 (1984) の深浦検潮所の水位の回復実験では水位の回復に要した時間を応答時間として読みとると 170 秒となる。ただし $H_0=22.0\text{cm}$ であった。これは岩船について推定した値と同じ H_0 で比較する時、長すぎる。この原因をすべて d におしつけると岩船の場合の d の 1/5 程度に小さくなっていなければならない。

§ 6. ま と め

細いガラス管を通じて、水溜から流出する水流の速度を測定し、速度係数 c を測定し

た。それをもとに応答時間をもとめる方法を提案した。これは水位差の平方根及び水溜と管の口径比の2乗に比例し、速度係数 c に反比例する。応答時間は水溜を検潮井戸とみなした場合の井戸の水位が外部水位に等しくなるのに要する時間である。

謝辞 この小論を書くにあたり東北大学後藤智明、東京工業大学佐竹健治との討論が参考になりました。ここに記して両氏に感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) Braddock, R.D., Response of a conventional tide gauge to a tsunami., *Marine Geodesy*, vol. 4, no. 3, 223-236, 1981.
- 2) Loomis, H.G., The nonlinear response of a tide gage to a tsunami, *Proc. 1983 Tsunami Symposium*, 177-185, 1983.
- 3) 村上, 検潮井戸の津波に対する応答, 港湾技研資料, No. 470, 217-223, 1983.
- 4) Noye, B.J., Tide-well system I: Some nonlinear effects of the conventional tide well. *J. Marine Res.*, vol. 32, 129-153, 1974.
- 5) 岡田・網野, 深浦検潮所の応答特性について, 1984年度日本海洋学会春季大会講演要旨, 1984.
- 6) 谷, 流れ学, 岩波書店, 1969.

Investigation of tide well response on the model.

Kuniaki ABE

Abstract

A model experiment of the outflow from the water reservoir through the glass tubes having the diameters of $3.0 \times 10^{-3} - 1.0 \times 10^{-2}$ m was carried out and the velocity coefficients c were measured. Response time, t_r , was defined and the values were calculated on the coefficients. It is an indicator characterizing the frequency response of tide well.